
ИНФОРМАЦИОННО-КОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 004.04

<https://doi.org/10.47533/2023.1606-146X.30>

**Ж. К. АБДУГУЛОВА, М. Н. ТЛЕГЕН, Г. А. УСКЕНБАЕВА, А. К. ШУКИРОВА,
Ж. М. ТАШЕНОВА, А. К. ЖУМАДИЛЛАЕВА**

*Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан
E-mail: meruert-0202@mail.ru*

СИСТЕМА АВТОМАТИЗАЦИИ НАГРЕВАТЕЛЬНОЙ ПЕЧИ

В данной статье рассматривается печь для термообработки, которая работает в непрерывном режиме под управлением обратной связи по температуре. Из-за ограничений, связанных с датчиками, температура деталей контролируется косвенно. Контроль распределения температуры в печи - схема, которая является фактически открытым контуром в отношении контроля температуры деталей. Печь разделена на четыре зоны контроля температуры, а массовый расход топлива, как природный газ, ко всем горелкам зоны регулируется одновременно для управления температурой этой конкретной зоны. Радиационное излучение на большом расстоянии от зоны к зоне влияет на температуру других зон, когда топливо расходуется в конкретной зоне. Печь работает при температуре свыше 1000 К, а время пребывания деталей в печи составляет порядка нескольких часов. Процесс создания заключается в нагреве предварительно подготовленных деталей из разных материалов до определенной температуры в непрерывно работающей печи аустенизация с последующим быстрым охлаждением закалки в воде, рассоле или масле для получения желаемых металлургических свойств, таких как твердость, вязкость, прочность на сдвиг, растяжение и др. В статье описываем систему работы нагревательной печи аустенизации и разрабатывается полумпирическая модель печи. Разрабатывается модель в двухмасштабном подходе к моделированию для решения задачи минимизации энергопотребления печи.

Ключевые слова: *печь, энергопотребление печи, термообработки, температурный профиль рекуператора, энергозатраты системы.*

Введение. Актуальность статьи заключается в том, что производство материалов в нагревательных печах считается энергоемким и одним из крупнейших источников выбросов CO₂. По прогнозам, к 2050 году для удовлетворения потребностей растущего населения ее использование увеличится в 1,5 раза по сравнению с нынешним уровнем.

Основной целью данного исследования является минимизация энергопотребления процесса производства материалов или термообработки, который в настоящее время работает на одном из промышленных предприятий, путем математического моделирования, оптимизации, усовершенствованного управления и интеграции тепла [2].

Методы и материалы. В статье используются методы, которые были разработаны ранее: двумерная (2D) физическая модель печи для термообработки, которая

рассчитывает энергопотребление печи и распределение температуры детали как функцию времени и положения в печи при управлении с обратной связью по температуре.

Влияние переменных процесса на микроструктурную эволюцию деталей, используя эмпирическое соотношение, описанное в литературе, и их последующее влияние на металлургические свойства закаленного продукта.

Физическая модель в сочетании с эмпирической моделью используется для моделирования работы печи для партии деталей, обрабатываемых последовательно при эвристических заданных значениях температуры с простой линейной стратегией управления, предложенной операторами завода.

Минимизируем энергопотребление печи без ухудшения качества продукции с помощью оптимизации в реальном времени (RTO) и интеграции тепла с помощью лучистых рекуператоров. Экономия энергии в 3,7%, 15,93% и 20,88% была получена при использовании модельного прогнозирующего управления, интеграции тепла и оптимизированных заданных значений соответственно по сравнению с эталонным эвристическим вариантом работы без интеграции тепла.

Сталь – это материал, используемый в мире, с объемом производства около 1,6 млрд метрических тонн в год. В связи с ростом населения и увеличением мирового благосостояния, прогнозы по использованию стали показывают увеличение на 50% по сравнению с нынешним уровнем к 2050 году.

Произведенная сталь, которая охлаждается с низкой скоростью, довольно мягкая и не является идеальной для многих применений. Поэтому стальные детали часто подвергаются термической обработке, чтобы вызвать желаемые металлургические свойства, такие как твердость, вязкость, прочность на сдвиг и прочность на разрыв. Твердость и прочность обычно повышаются путем закалки - процесса термообработки, который заключается в нагреве готовых или предварительно обработанных деталей до определенной температуры в инертной атмосфере для предотвращения окисления поверхности с последующей быстрой закалкой в масле или воде для перехода в закаленную фазу, называемую мартенситом. Процесс закалки потребляет значительное количество энергии обычно природного газа для нагрева деталей от температуры окружающей среды до температуры около 1050К. Температуру деталей, особенно сердцевины, невозможно определить и измерить.

Следовательно, на практике операторы склонны перегревать детали так, чтобы температура, необходимая для обработки, достигала минимальный порог, тем самым вызывая избыточный расход топлива. Другая причина перегрева заключается в том, что даже если только некоторые части изготавливаемой детали не нагреты в достаточной степени, то вся деталь не будет соответствовать стандартам качества, что приведет к отходам. Поэтому денежный выигрыш от минимизации энергии при нагреве будет уравновешен потерями из-за отбраковки дефектных деталей.

Ограничения, связанные с определением температуры, в сочетании с высоким потреблением энергии, делают печь аустенизации основной целью для усовершенствованной реконфигурации, оптимизации и управления на основе моделей.

В процессе термообработки температура детали повышается, происходит фазовое превращение стали в аустенит, а также микроструктурные изменения, зависящие

от температуры и скорости нагрева. Все эти явления определяют металлургические свойства закаленной стали. Процесс термообработки был изучен как на макроскопическом уровне (т.е. в масштабах длины печи и детали), так и на микроскопическом уровне, рассматривая микроструктурную эволюцию деталей. На макроскопическом уровне было проведено несколько исследований, по моделированию печей были сосредоточены на определении профиля температуры деталей как функции времени (и положения) в печи.

Целью термообработки является автоматизация системы нагревательной печи. Многие исследования металлообрабатывающих печей сосредоточены на толкательных системах. Хотя нагревательные печи геометрически похожи на печи для термообработки, рассматриваемые в данной работе детали, обрабатываемые в нагревательных печах, нагреваются косвенно с помощью излучающих трубчатых горелок. Поэтому при разработке математических моделей для нагревательных печей прямого нагрева необходимо учитывать радиационное взаимодействие газа с поверхностью, в то время как в печах для термообработки с косвенным нагревом, как будет обсуждаться далее, эти взаимодействия являются пренебрежимо малы, и преобладающим способом передачи тепла является излучение от поверхности к поверхности. Поскольку повторный нагрев является этапом предварительной обработки, контакт между деталями или плитами допускается.

С другой стороны, термообработка проводится для упрочнения готовых деталей. Следовательно, детали располагаются на некотором расстоянии друг от друга. Как следствие, радиационное взаимодействие между подобными поверхностями является критическим и должно быть учтено в моделях наряду с взаимодействиями между горелкой и поверхностями деталей.

В статье описываем систему работы нагревательной печи аустенизации и разрабатывается полуэмпирическая модель печи. Печь работает в непрерывном режиме под управлением обратной связи по температуре. Температура в печи превышает 1000 К. Поэтому дальнейшее излучение является доминирующим способом передачи тепла. Более того, при нагреве деталей, помимо изменения температуры, изменяется и микроструктура, которая влияет на металлургические свойства закаленного продукта. Поэтому разработанная модель отражает физику на обоих вышеупомянутых масштабах длины: дальнейшее излучение и трансформация микроструктуры.

Проблема оптимизации – это определение условий работы печи, которые минимизируют общее потребление энергии без ухудшения качества продукции. Детали должны быть нагреты за желаемый порог с минимальными неоднородными колебаниями температуры. Также существует ограничение на изменения микроструктуры, чтобы обеспечить желаемые металлургические свойства закаленного продукта. Для решения задачи оптимизации используются суррогатные модели, что позволяет значительно сократить вычислительные затраты.

Сокращение расхода топлива в системе за счет тепловой интеграции с использованием рекуператоров-теплообменников специального назначения, работающих по принципу "подача-выпуск". Моделирование печи и наблюдения на заводе показывают, что значительное количество энергии, поступающей в систему, нерационально сбрасывается в выхлопные газы. Эти потери тепла минимизируются путем передачи

части тепла выхлопных газов для предварительного нагрева воздуха на входе в горелки, тем самым уменьшая количество топлива, необходимого для сжигания. Температура выхлопных газов обычно превышает 1000 К, следовательно, излучение является доминирующим способом передачи тепла в рекуператоре. Моделирование рекуператора с концентрическими трубами учитывает местную конвекцию и зависит от геометрии излучения на большие расстояния.

Обзор двумерной (2D) модели печи для термообработки представлен на рисунке 1. Поскольку система работает при температурах выше 1000 К, излучение является доминирующим способом передачи тепла.

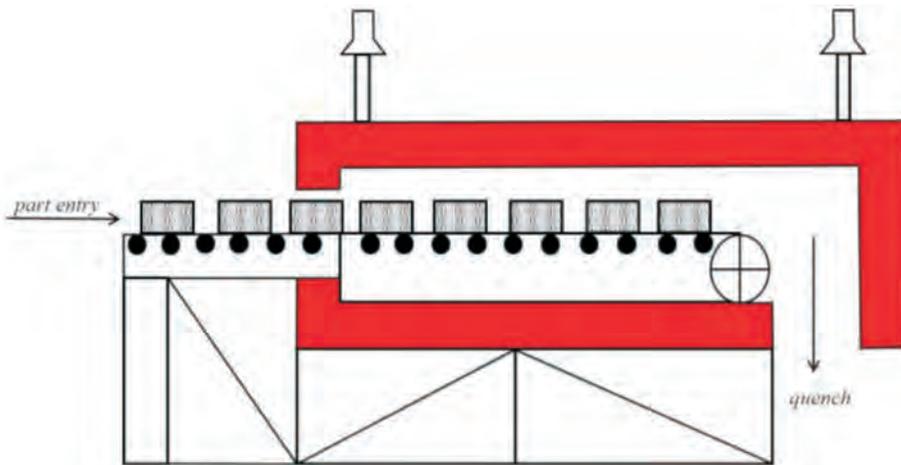


Рисунок 1 – Схема прототипа печи с роликовым подом.

Заштрихованные прямоугольники – это детали, которые нагреваются в печи.

В этой модели, основанной на излучении, печь дискретизируется на три типа поверхностей в зависимости от ее геометрических элементов, а именно горелка, изоляция и нагрузка. Схема дискретизированной двумерной печи показана на рисунке 2. Геометрические детали печи, а также детали и физические свойства, используемые в данной работе.

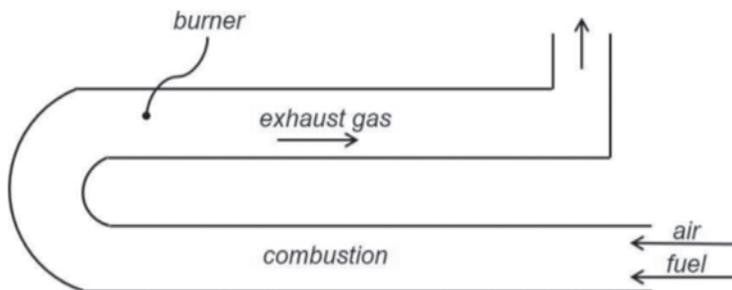


Рисунок 2 – Схема U-образной трубчатой горелки, в которой топливо (природный газ) смешивается с воздухом для сжигания. Тепло от горелки косвенно передается деталям в печи преимущественно путем излучения внутри печи.

При разработке модели были сделаны следующие допущения:

1. Масса конвейерной ленты намного меньше массы деталей. Следовательно, конвейерной лентой в модели пренебрегают. Тем не менее, движение деталей внутри печи улавливается.

2. В промышленной системе цилиндрические детали с овальной формой вершины загружаются на лоток и помещаются на конвейерную ленту. Идеализированная прямоугольная геометрия с эквивалентной массой металла рассматривается для ансамбля лотка и находящихся в нем деталей.

3. Поскольку азот является двухатомным газом, радиационный теплообмен между газом и поверхностью отсутствует. Теплообмен между газом и поверхностью происходит только за счет конвекции, а теплопередача от поверхности к поверхности происходит только через излучение [3].

4. Для целей моделирования печь дискретизируется на ряд управляющих объемов для расчета профиля температуры газа по длине печи. Пространственная вариация температуры азота отсутствует.

Параметры нашей модели основаны на практике и оценены на основе следующих данных: температуры зон могут быть измерены как функция времени с помощью термопар, размещенных на средних изоляционных поверхностях каждой зоны, в то время как температура детали на выходе из печи также может быть измерена бесконтактным методом сверхзвуковых измерений.

Алгоритм решения. При организации технологического процесса рассматриваем итерационную процедуру решения для уравнений теплопередачи и теплового баланса печи. Движение деталей в печи аппроксимируется как серия дискретных событий. Скорость движения деталей определяется скоростью конвейерной ленты. Шаг по времени и расстояние, которое проходит деталь за один шаг по времени для моделирования печи фиксируется на значении, которое фиксирует значимые изменения в температурном поле при минимальных вычислительных затратах. Вычисление матрицы коэффициентов обзора, зависящих от геометрии, требует больших вычислительных затрат. Для того чтобы повысить скорость, коэффициенты обзора между различными парами поверхностей были предварительно вычислены и занесены в таблицу и геометрия деталей фиксирована. Поэтому предварительно рассчитанную матрицу коэффициентов обзора может быть использована для моделирования печи при различных условиях эксплуатации. После того, как вычисляются коэффициенты обзора, уравнения энергетического баланса решаются с помощью следующей процедуры для расчета температурного и теплового профилей печи как функции времени:

- Инициализировать систему с температурами и тепловыми обязанностями всех поверхностей печи, включая поверхности деталей.
- Определить детали, которые в настоящее время обрабатываются в печи путем учета деталей, которые были удалены, и деталей, которые были вновь введены.
- Решить модель горелки для расчета температур и тепловых значений всех поверхностей горелки для заданного массового расхода топлива, определяемого контроллером обратной связи.
- Решить вопрос об излучениях при заданных температурах поверхностей.

- Используя радианты поверхностей детали и изоляции, рассчитать обновленные температуры и тепловые обязанности поверхностей детали и изоляции.
- Повторять шаги (3)-(5), пока система не сойдется к желаемому допуску.
- Используя тепловые обязанности поверхностей деталей, рассчитать неоднородное распределение температуры всех активных деталей с помощью схемы Кранка-Николсона.
- Используя тепловые обязанности поверхностей изоляции, рассчитать потери тепла в окружающую среду через изоляционные стенки.
- Отрегулировать температуру в зонах до желаемых заданных значений, путем регулирования расхода топлива на горелки (управление с обратной связью).
- Переместить лоток в следующее место, увеличить время на один временной шаг и повторить шаги (2)-(9), пока партия деталей не будет последовательно обработана в печь (рисунок 3).

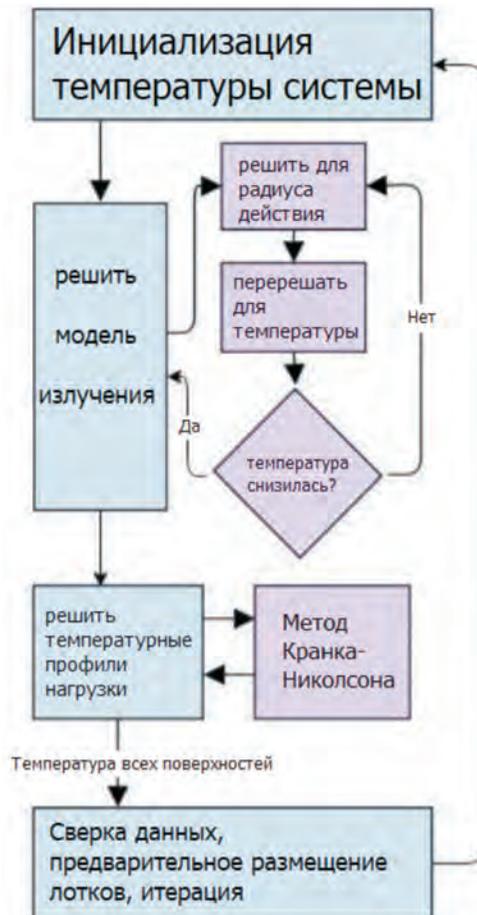


Рисунок 3 – Алгоритм решения для расчета температур и тепловых обязанностей всех поверхностей в печи и использование тепловых обязанностей поверхностей деталей для расчета неоднородных распределений температуры деталей.

Для получения бездефектного и структурно прочного продукта необходимо контролировать не только макроскопические свойства, такие как температура, но и контролировать микроскопические свойства, такие как размер зерна аустенита. Микроструктурные изменения происходят на гораздо меньшем масштабе длины по сравнению с макромасштабной температурной эволюцией. Поэтому используется двухмасштабный подход к моделированию для расчета распределения размера зерна в деталях в дополнение к распределению температуры в процессе аустенитизации и их влияния на металлургические свойства закаленного продукта [4,5].

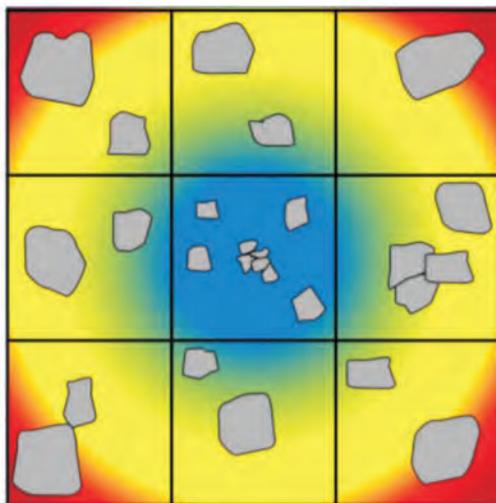


Рисунок 4 – Иллюстративная диаграмма температуры детали и распределения зерен по размерам.

Иллюстративная диаграмма температуры детали и распределения зерен по размерам показано в рисунке 4. Осажденные зерна аустенита представлены фигурами, заполненными серым цветом. Области вблизи поверхности детали, которые нагреваются излучением, имеют более высокую температуру и, следовательно, более крупные зерна [6]. С другой стороны, внутренние области, которые нагреваются только за счет проводимости, имеют более низкую температуру.

Подход к решению. Итерационный алгоритм используется для решения уравнений сохранения энергии для получения профилей температуры поверхности и газа. Коэффициенты обмена между всеми парами поверхностей для рекуператора рассчитываются заранее, так как геометрия системы фиксирована [7].

Последовательность вычислений в алгоритме решения показана на блок-схеме на рисунке 5. Известны температуры дымовых газов и воздуха на входе.

Температуре первого элемента в канале дымовых газов присваивается значение температуры дымовых газов на входе, а температуре последнего элемента в канале холодного воздуха из-за противоточного расположения потока присваивается значение температуры воздуха на входе. Управляющие уравнения разделены на нерадикационную и радиационную части.



Рисунок 5 – Итерационный алгоритм решения для определения температурного профиля лучистого рекуператора.

Температура последнего элемента в канале горячего воздуха является температурой воздуха на входе в горелку в печи [8].

Поскольку коэффициенты обзора между поверхностями значительно отличаются, матрица коэффициентов линейной системы уравнений для расчета излучения, которая зависит от этих коэффициентов обзора, может стать плохо обусловленной.

Обсуждение результатов эксперимента. В рассматриваемой модели печи предполагается, что детали движутся дискретно, причем каждая деталь перемещается между заранее определенными местами на каждом временном шаге печи (4 мин). На каждом временном шаге модель печи решается для определения распределения температуры деталей. Контроллер с обратной связью, с другой стороны, определяет и регулирует расход топлива на горелки через другой фиксированный интервал времени, называемый временным шагом контроллера, который может быть больше или равен временному шагу печи. Шаг по времени контроллера равен шагу по времени печи. Массовый расход дымовых газов горелки может изменяться каждый раз, когда контроллер обратной связи активен, т.е. после каждого временного шага контроллера. Однако температура дымовых газов может меняться после каждого временного шага печи, поскольку она зависит от динамики печи. Так как и массовый расход, и температура дымовых газов являются входными данными для рекуператора, уравнения модели решаются с помощью вышеупомянутой итерационной процедурой на каждом

временном шаге топки. За исключением первой и последней частей, печь работает в режиме постоянного входа-выхода. При этом условии происходят лишь незначительные изменения в таких переменных, как скорость потока и температуры выхлопных газов горелки. Поэтому одинаковые начальное предположение о температуре поверхности рекуператора было предоставлено для расчетов для всех горелок во все моменты времени. Потребуется менее 10 итераций, чтобы температуры рекуператора сошлась с соответствующим начальным решением.

Температурный профиль рекуператора в установившемся режиме при постоянном расходе дымовых газов. Наш промышленный партнер предоставил информацию о том, что воздух не должен нагреваться выше 533,15 К для ограничения выбросов NOx. Исходя из уравнений модели и интуиции, максимальный нагрев воздуха происходит при минимальном массовом расходе газов. Было проверено, что при нижней границе массового расхода дымовых газов (0,07 кг/с) это условие выполняется для следующих параметров модели, которые основаны на типичных значениях для данной системы, подтвержденных партнером по отрасли: $C_{p,F G} = 1,37$ кДж/кг-К, $C_{p,air} = 1$ кДж/кг-К, $h_{F G} = 150$ Вт/м² -К, $h_{amb} = 100$ Вт/м² -К, и $k_{ins} = 0,15$ Вт/м-К.

Для этого условия прогнозируемых температур газов в рекуператоре показаны на графике в зависимости от индекса элемента на рисунке 6. Видно, что температура горячего воздуха, представленная синей линией при индексе элемента 6 (выход из рекуператора), близка, но в пределах верхнего предела. Соответствующие температуры поверхности элементов рекуператора показаны на рисунке 7. Поскольку верхний предел температуры горячего газа составляет 533,15 К для массового расхода 0,07 кг/с (нижняя граница горелки), а температура дымовых газов выше 1000 К, почти весь нагрев происходит в канале горячего воздуха из-за его близости к горячему дымовому газу для данного рабочего состояния.

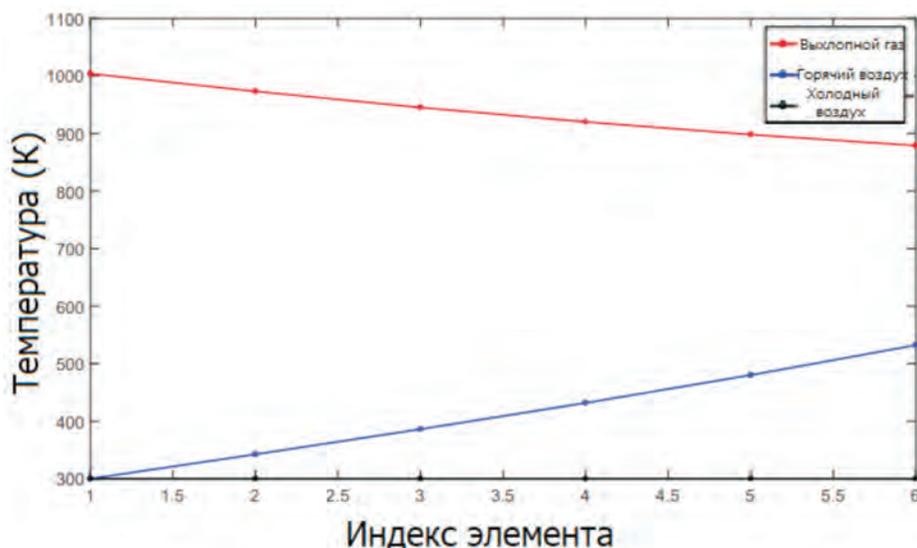


Рисунок 6 – Температурные профили дымового газа, горячего воздуха и холодного воздуха рекуператора при минимально допустимом расходе топлива на горелку.

Сначала была смоделирована модель печи с рекуператором на каждой горелке при эвристических заданных значениях температуры зоны, предложенных операторами завода: [1000 К, 1150 К, 1200 К и 1250 К] для зон с 1 по 4 соответственно. Печь рассчитана на 8 деталей, и моделирование проводилось для последовательной обработки партии из 40 деталей. Условия выхода всех деталей и изменение энтальпии в системе показаны на рисунке 6. Видно, что минимальная и средняя температуры, представленные зелеными и красными линиями соответственно, достигают постоянного значения в пределах первых 6 частей. В печи меньше деталей и, следовательно, меньше теплоотводов во время работы до и после установившегося состояния постоянного ввода/вывода частей. Следовательно, температуры и энтальпия первых нескольких частей и последних двух частей показывают небольшое отклонение от значений установившегося режима. На рисунке 7 пунктирные линии представляют среднее значение плюс и минус стандартные отклонения в температуры неоднородных частей на выходе из печи [9,10].

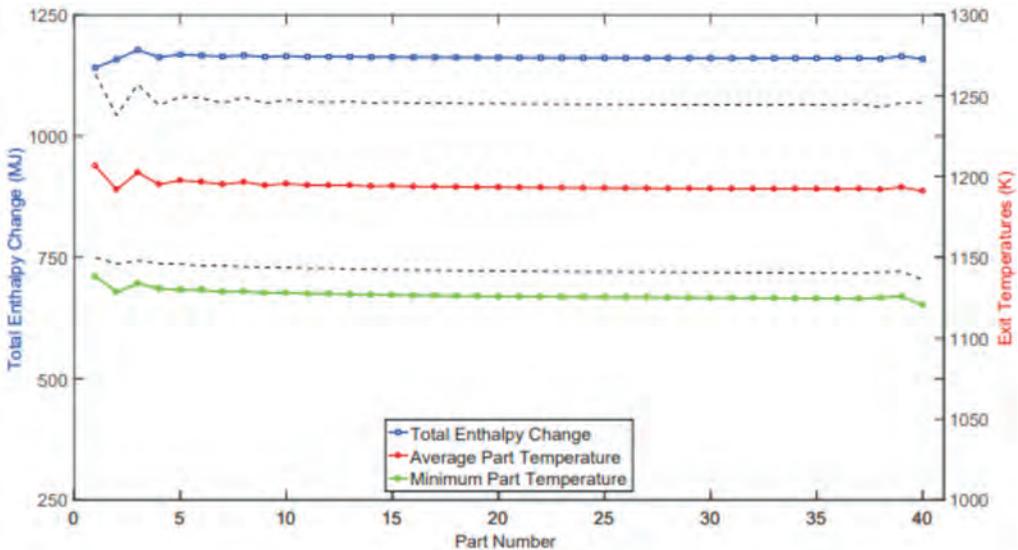


Рисунок 7 – Условия выхода всех 40 деталей, последовательно обработанных в печи, оснащенной рекуператорами, при эвристическом задании температуры зоны заданных значений.

Закключение. Проверка модели с помощью измерений в реальном времени будет первым шагом на пути к дальнейшему развитию. Повышение численной точности модели потребует оценки параметров модели на основе данных измерений в реальном времени. Многомасштабная модель является процедурной, поэтому оценка ее параметров является сложной задачей.

Решение проблемы заключается в поиске в пространстве параметров, точки набора значений параметров, соответствующие параметры модели которой хорошо согласуются с экспериментальными наблюдениями. Решение, найденное методом прямого поиска, не- гарантированно является глобальным решением.

В рекуператоре теплообменник обменивается теплом между выхлопными газами горелки и воздухом на входе в ту же горелку. Влияние теплообмена с другой горелкой на экономию энергии, тем самым определяется оптимальная сеть теплообмена. Теплообмен с использованием различных имеющихся в продаже теплообменников, пригодных для работы в температурных условиях печи.

Моделирование печи и наблюдения показывают, что более 40% энергии, поступающей в печь аустенизации, нерационально сбрасывают в выхлопные газы. Поэтому была предпринята попытка минимизировать эти потери путем рекуперации части тепла в газах горелки для предварительного нагрева воздуха, подаваемого в горелки, с помощью рекуператора. Рекуператор кожухотрубного типа моделируется в виде центральной трубы и двух концентрических кольцевых каналов. Разработанная радиационная модель рекуператора учитывает местную конвекцию и дальнейшее радиационное взаимодействие. Работа печи была оптимизирована с использованием суррогатных моделей. Результаты показали 15,93% экономии топлива для печи, оснащенной рекуператорами, в эвристическом случае с незначительными изменениями условий выхода деталей по сравнению с базовым вариантом без рекуператоров. Дополнительная экономия энергии в размере 5,87% была получена, когда печь, в частности, значения местных регуляторов температуры была оптимизирована.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 W. S. Association et al. *Ustojchivaya stal': V osnove zelenoj ekonomiki*. Rue Colonel Bourg, 120, 2012.
- 2 E. F. Camacho and C. B. Alba. *Model'noe prognoziryushchee upravlenie*. Springer Science & Business Media, 2013.
- 3 S. C. Chapra and R. P. Canale. *Chislennye metody dlya inzhenerov*, tom 2. McGraw-Hill, 2012.
- 4 W. Chen, Y. Chung, and J. Liu. *Analiz energopotrebleniya i proizvoditel'nosti pechej povtornogo nagreva na stane goryachej prokatki. Mezhdunarodnye kommunikacii v teplo- i massoobmene*, 32(5):695-706, 2005.
- 5 Cozad, N. V. Sahinidis, and D. C. Miller. *Obuchenie surrogatnym modelyam dlya optimizacii na osnove imitacionnogo modelirovaniya*. *Zhurnal AIChE*, 60(6):2211-2227, 2014.
- 6 D. Demailly and P. Quirion. *Evropejskaya skhema trgovli kvotami na vybrosy i konkurentosposobnost'*: *Issledovanie na primere chernoj metallurgii*. *Energy Economics*, 30(4):2009-2027, 2008.
- 7 T. F. Edgar and E. N. Pistikopoulos. *Umnoe proizvodstvo i energeticheskie sistemy*. *Computers & Chemical Engineering*, 2017. doi: 10.1016/j.compchemeng.2017.10.027.
- 8 A. A. Fawcett, G. C. Iyer, L. E. Clarke, J. A. Edmonds, N. E. Hultman, H. C. McJeon, J. Rogelj, R. Schuler, J. Alsalam, G. R. Asrar, et al. *Mogut li obyazatel'stva, prinyatyje v Parizhe, predotvratit' ser'eznoe izmenenie klimata?* *Science*, 350(6265): 1168-1169, 2015.
- 9 H. S. Ganesh, T. F. Edgar, and M. Baldea. *Model'noe prognoziryushchee upravlenie temperatury vyhodnoj chasti pechi dlya austenizacii*. *Processy*, 4 (4):53, 2016.
- 10 H. S. Ganesh, T. F. Edgar, and M. Baldea. *Modelirovanie i model'no-prognosticheskoe upravlenie pech'yu austenitizacii*. *Tekhassko-Viskonsinsko-Kalifornijskij konsorcium po upravleniyu*, fevral' 2016, Ostin, Tekhas, SShA. TWCCC, 2016.

REFERENCES

- 1 W. S. Association et al. Ustojchivaya stal': V osnove zelenoj ekonomiki. Rue Colonel Bourg, 120, 2012.
- 2 E. F. Camacho and C. B. Alba. Model'noe prognoziryushchee upravlenie. Springer Science & Business Media, 2013.
- 3 S. C. Chapra and R. P. Canale. Chislennyye metody dlya inzhenerov, tom 2. McGraw-Hill, 2012.
- 4 W. Chen, Y. Chung, and J. Liu. Analiz energopotrebleniya i proizvoditel'nosti pechej povtornogo nagreva na stane goryachej prokatki. Mezhdunarodnye kommunikacii v teplo- i massoobmene, 32(5):695-706, 2005.
- 5 Cozad, N. V. Sahinidis, and D. C. Miller. Obuchenie surrogatnym modelyam dlya optimizacii na osnove imitacionnogo modelirovaniya. Zhurnal AIChE, 60(6):2211-2227, 2014.
- 6 D. Demailly and P. Quirion. Evropejskaya skhema trgovli kvotami na vybrosy i konkurenciosposobnost': Issledovanie na primere chernoj metallurgii. Energy Economics, 30(4):2009-2027, 2008.
- 7 T. F. Edgar and E. N. Pistikopoulos. Umnoe proizvodstvo i energeticheskie sistemy. Computers & Chemical Engineering, 2017. doi: 10.1016/j.compchemeng.2017.10.027.
- 8 A. A. Fawcett, G. C. Iyer, L. E. Clarke, J. A. Edmonds, N. E. Hultman, H. C. McJeon, J. Rogelj, R. Schuler, J. Alsalam, G. R. Asrar, et al. Mogut li obyazatel'stva, prinyaty v Parizhe, predotvratit' ser'eznoe izmenenie klimata? Science, 350(6265): 1168-1169, 2015.
- 9 H. S. Ganesh, T. F. Edgar, and M. Baldea. Model'noe prognoziryushchee upravlenie temperatury vyhodnoj chasti pechi dlya austenizacii. Processy, 4 (4):53, 2016.
- 10 H. S. Ganesh, T. F. Edgar, and M. Baldea. Modelirovanie i model'no-prognosticheskoe upravlenie pech'yu austenitizacii. Tekhassko-Viskonsinsko-Kalifornijskij konsorcium po upravleniyu, fevral' 2016, Ostin, Tekhas, SShA. TWCCC, 2016.

**Ж. К. АБДУГУЛОВА, М. Н. ТЛЕГЕН, Г. А. УСКЕНБАЕВА, А. К. ШУКИРОВА,
Ж. М. ТАШЕНОВА, А. К. ЖУМАДИЛЛАЕВА**

*Еуразия ұлттық университеті. Л. Н. Гумилева,
Астана, Қазақстан*

ЖЫЛЫТУ ПЕШІН АВТОМАТТАНДЫРУ ЖҮЙЕСІ

Бұл мақалада температураның кері байланысы бақылауында үздіксіз жұмыс істейтін термиялық өңдеу пеші талқыланады. Датчиктердің шектеулеріне байланысты бөлшектердің температурасы жанама түрде басқарылады. Пештегі температураның таралуын бақылау – бұл шын мәнінде бөлшектердің температурасын бақылауға қатысты ашық контур болып табылатын тізбек. Пеш төрт температураны бақылау аймағына бөлінген және табиғи газ сияқты аймақтағы барлық қыздырғыштарға отынның массалық ағыны сол аймақтың температурасын бақылау үшін бір уақытта бақыланады. Аймақтан аймаққа үлкен қашықтықтағы радиациялық сәуле белгілі бір аймақта отын тұтынылған кезде басқа аймақтардың температурасына әсер етеді. Пеш 1000 К жоғары температурада жұмыс істейді, ал бөлшектердің пеште тұру уақыты бірнеше сағатты құрайды. Жасау процесі әртүрлі материалдардан алдын ала дайындалған бөлшектерді үздіксіз жұмыс істейтін аустениттеу пешінде белгілі бір температураға дейін қыздырудан тұрады, содан кейін қаттылық, қаттылық, кесу сияқты қажетті металлургиялық қасиеттерді алу үшін суда, тұзды ерітіндіде немесе майда жылдам салқындату және сөндіруден

тұрады. беріктігі, созылу беріктігі және т.б. Мақалада біз аустениттеу жылыту пешінің жұмыс жүйесін сипаттаймыз және пештің жартылай эмпирикалық үлгісін әзірлейміз. Пештің энергия шығынын азайту мәселесін шешу үшін екі масштабты модельдеу тәсілінде модель құрастырылған.

Түйін сөздер: пеш, пештің қуат тұтынуы, термиялық өңдеу, регенератордың температуралық профилі, жүйенің энергия шығыны.

**J. K. ABDUGULOVA, M. N. TLEGEN, G. A. USKENBAYEVA, A. K. SHUKIROVA,
J. M. TASHENOVA, A. K. ZHUMADILLAYEVA**

*L.N. Gumilyov Eurasian National University,
Astana, Kazakhstan*

HEATING FURNACE AUTOMATION SYSTEM

This article discusses a heat treatment furnace that operates continuously under temperature feedback control. Due to the limitations of the sensors, the temperature of the parts is controlled indirectly. Control of the temperature distribution in the furnace is a circuit that is actually an open loop in relation to the control of the temperature of the parts. The furnace is divided into four temperature control zones, and the mass flow of fuel, like natural gas, to all burners in a zone is controlled simultaneously to control the temperature of that particular zone. Radiation radiation at a great distance from zone to zone affects the temperature of other zones when fuel is consumed in a particular zone. The furnace operates at temperatures above 1000 K, and the residence time of the parts in the furnace is on the order of several hours. The creation process consists in heating pre-prepared parts from different materials to a certain temperature in a continuously operating austenitizing furnace, followed by rapid cooling and quenching in water, brine or oil to obtain the desired metallurgical properties, such as hardness, toughness, shear strength, tensile strength, etc. In the article, we describe the operation system of the austenitization heating furnace and develop a semi-empirical model of the furnace. A model is developed in a two-scale modeling approach to solve the problem of minimizing the energy consumption of a furnace.

Keywords: furnace, energy consumption of the furnace, heat treatment, Temperature profile of the recuperator, energy consumption of the system.